

УДК 621.472

В.Н. Казак, д.т.н.  
О.К. Горбач**СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Аэрокосмический Институт, НАУ, e-mail: post@nau.edu.ua

Аэрокосмический Институт, НАУ, e-mail: solarandwind@i.ua

*Рассмотрены основные сферы применения беспилотных летательных аппаратов. Проведен анализ основных публикаций по теме разработки летательных аппаратов с использованием солнечных элементов. Приведены основные особенности соединения солнечных элементов друг с другом и их характеристики. Предложено использование системы управления отбором мощности солнечных элементов как источника питания силовой установки беспилотного летательного аппарата.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, солнечный элемент, электрические двигатели.

**Введение**

Бурное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за последние десятилетия привлекает внимание из-за их многообещающего потенциала применения в военных и гражданских целях. Актуальность модернизации существующих и разработка новых экземпляров беспилотных авиационных систем определяется постоянным расширением сфер их применения [1]:

1. Обнаружение малоразмерных объектов: воздушных; надводных; наземных.
2. Управление воздушным движением: в труднодоступных районах; при стихийных бедствиях и авариях; на временных воздушных трассах в авиации народного хозяйства.
3. Контроль морского судоходства: поиск и обнаружение судов; предупреждение аварийных ситуаций в портах; контроль морских границ; контроль правил рыболовства.
4. Развитие региональных и межрегиональных телекоммуникационных сетей: системы связи, в том числе мобильные; телерадиовещание; ретрансляция; навигационные системы; оповещения о стихийных бедствиях и др.
5. Аэрофотосъемка и контроль земной поверхности: аэрофотосъемка (картография); инспекция соблюдения договорных обязательств; режим «открытого неба»; контроль гидро-, метеосостояния; контроль активно излучающих объектов, контроль ЛЕП.
6. Контроль экологического состояния: радиационный контроль; газохимический контроль; контроль состояния газо- и нефтепроводов; опрос сейсмических датчиков; обнаружение нефтяных или ядовитых веществ на воде и мониторинг их размеров и направлений движения.
7. Обеспечение сельскохозяйственных работ и геологоразведки: определение характеристик грунта; разведка полезных ископаемых; подповерхностное (до 100 м) зондирование Земли.
8. Океанология: разведка ледяного состояния; наблюдение за волнением моря; поиск косяков рыб; наблюдение за миграцией морских животных и птиц.

Из поставленных гражданским сектором рынка задач применения БПЛА, следует отметить функции мониторинга и контрольные функции БПЛА. С помощью беспилотных систем можно осуществлять контроль, как технического состояния объектов, так и их безопасность и функционирование, притом, что контролируемые объекты могут находиться на большом удалении (протяженные объекты). Отсюда можно сделать вывод, что БПЛА, находят применение в организациях с высокой протяженностью и территориальной обширностью объектов наблюдения. К таким организациям относятся владельцы трубопроводного транспорта, пограничные службы, ОАО «Укрзалізниця», пожарные части, службы надзора за участками рыбного промысла. В этом случае воздушный мониторинг является наиболее эффективным средством дистанционного сбора данных. Поэтому актуальной является проблема создания дешевых, безопасных, простых в обслуживании, высоконадежных и точных носителей соответствующего оборудования. Международный опыт показывает, что данным

требованиям отвечают БПЛА и, особенно ЛА с экологически чистыми силовыми установками, например, электрическими двигателями.

Мировая тенденция развития и внедрения возобновляемых и более экологически безвредных источников энергии показывает, что одним из наиболее перспективных направлений в развитии летательных аппаратов является разработка БПЛА с использованием солнечных элементов для питания электроэнергией двигателей и бортового оборудования. Современные солнечные элементы, в том числе украинского производства, имеют КПД 15-20%. Появление пленочных *GaAs*, многослойных *GaInP/GaAs/Ge* солнечных элементов с КПД до 24-32% дает возможность получения с одного квадратного метра поверхности 200 - 300 Вт электроэнергии. Вес элементов составляет около 10 г/Вт, что не является препятствием в их использовании. Поэтому использование солнечных элементов в качестве источника питания БПЛА, как альтернативных неисчерпаемых источников энергии является хорошей перспективой. Возможность использования солнечных элементов в качестве основного бортового источника постоянного тока, требует, чтобы БПЛА был оборудован соответствующими электрическими двигателями.

#### **Анализ исследований и публикаций**

Публикации по теме разработки летательных аппаратов с использованием солнечных элементов можно встретить в зарубежных научных изданиях. Проанализируем наиболее примечательные из них:

*Solar Challenger*. Летательный аппарат американского разработчика Пола Макриди [3] с максимальной мощностью силовой установки 2,5 кВт преодолел Английский Канал 7 июля 1981 года только за счет использования солнечной энергии.

*Solair 1* Гюнтера Рочельта совершил полет с установленными 2500 фотоэлектрическими элементами, что позволяет генерировать мощность 2,2 кВт.

*Sunseeker*, Эрика Рэймонда пересек США в 21 этап. Самым длительным перелет составил 400 км. Вес летательного аппарата около 89 килограмм и оборудован он солнечными элементами из аморфного кремния.

Алан Кокони совершил 48-часовой непрерывный полет на беспилотном летательном аппарате с 5-метровый размахом крыла, силовая установка и оборудование которого полностью запитаны от солнечной энергии. Летательный аппарат оснащен батареей и способен лететь ночью, за счет энергии, которая была сгенерирована и сохранена в нем днем.

*Helios* сконструированный NASA [4], является дистанционно управляемым летательным аппаратом, с размахом крыла более 70 метров, установил рекорд высоты около 30 км и рассматривался в качестве возможной альтернативы спутников связи.

На примере приведенного анализа можно сделать вывод о том, что БПЛА класса микро, мини, малые, легкие (миди) являются наиболее подходящими для размещения таких источников питания как солнечные батареи. Для питания маломощных силовых установок и оборудования БПЛА перечисленных классов необходима солнечная батарея не высокой стоимости.

#### **Постановка задачи**

При работе с солнечными батареями, как правило, сталкиваются с явлением, не имеющим места при использовании обычных источников питания. Частичное затенение солнечной батареи вызывает падение выходного напряжения за счёт потерь в неосвещённом элементе, который начинает выступать в роли паразитной нагрузки. Поэтому одной из важнейших задач является оптимизация размещения и соединения солнечных элементов, устранение возможности появления обратного смещения [2] при затенении одного из солнечных элементов.

Из анализа публикации по теме разработки ЛА с использованием солнечных элементов следует, что материалы по системам управления энергетической установкой БПЛА мало представлены. Поэтому основной задачей является исследование возможности разработки комплексной системы управления энергетической установкой БПЛА. Комплексная система управления должна включать в себя: систему управления отбором мощности солнечных элементов, систему управления оптимальной зарядкой аккумуляторных батарей, систему

управления силовой установкой и питанием бортовых потребителей. Следовательно, комплексная система управления должна обеспечивать бесперебойное питание силовой установки БПЛА, включать в себя алгоритм управления отбором энергии по приоритету от нескольких источников питания.

### Основной материал

Для решения поставленных задач вначале рассмотрим принцип работы солнечного элемента, который заключается в следующем. При освещении солнечный элемент генерирует электрическое напряжение величиной 0.5 В. Независимо от типа и размера все солнечные элементы (большие и малые) генерируют одинаковое напряжение. Выходной ток элемента зависит от интенсивности света и размера элемента.

Солнечные элементы, рассматривая их как обычные батареи можно соединять последовательно и параллельно с целью повышения выходных характеристик. С точки зрения увеличения выходного тока последовательное соединение солнечных элементов обладает присущим ему недостатком – выходной ток не превосходит уровня, характерного для худшего элемента в цепи. Это означает, что при любом числе дво-амперных солнечных элементов в цепи одно-амперный элемент будет определять величину полного выходного тока, т. е. 1 А.

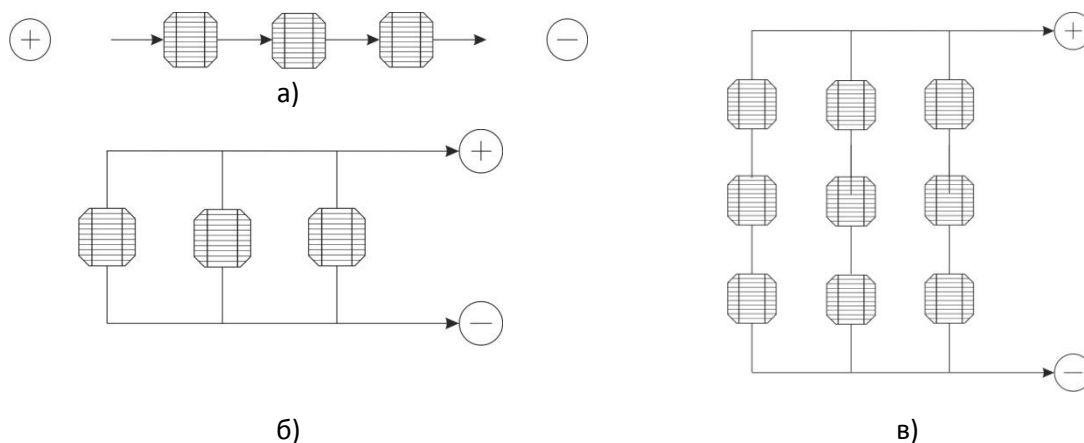


Рис. 1. Типы включения солнечных элементов: а) последовательно, б) параллельное, в) последовательно-параллельное.

При работе с солнечными батареями, сталкиваются с явлением, не имеющим места при использовании обычных источников питания. Это явление связано с так называемым обратным смещением.

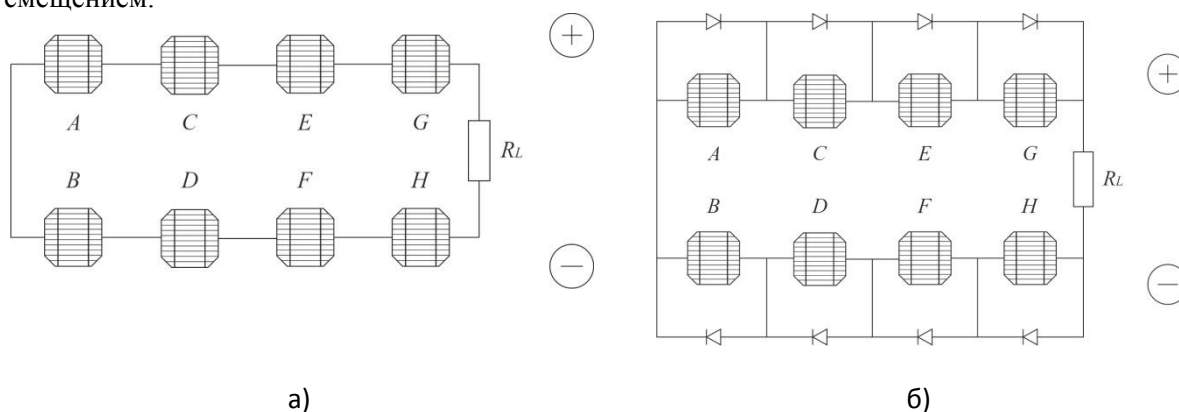


Рис. 2. Последовательное соединение солнечных элементов: а) схема, в которой возможно появление обратного смещения, б) схема, в которой устранена возможность появления обратного смещения.

На этом рис. 2а изображены 8 последовательно соединенных элементов. Полное выходное напряжение цепочки составляет - 4 В, а в качестве нагрузки подключен резистор  $R_L$ . Допустим, что фотоэлемент D затемнили непрозрачным предметом, например рукой. Солнечный элемент, который не производит электрической энергии, представляет собой звено с большим внутренним сопротивлением, а не короткую. Происходит то же, что и при размыкании

выключателя, но этот выключатель разомкнут не полностью — через него протекает небольшой ток. В большинстве случаев эффективное сопротивление затемненного солнечного элемента во много раз больше величины нагрузочного резистора  $R_L$ . Поэтому практически можно рассматривать  $R_L$  как кусок проволоки, соединяющий отрицательный и положительный выводы. Это означает, что функцию нагрузки выполняет теперь элемент  $D$ . Остальные элементы снабжают энергией эту нагрузку. В результате элемент  $D$  разогревается и при достаточно сильном разогреве может выйти из строя (взорваться). Эффективный путь решения этой проблемы — параллельное подключение шунтирующих диодов ко всем элементам, как это показано на рис. 2б. Диоды подключены так, что при работе солнечного элемента они обратно смещены напряжением самого элемента. Поэтому через диод ток не протекает, и батарея функционирует нормально. Предположим теперь, что один из элементов затеняется. При этом диод оказывается прямо смещенным и через него протекает ток в нагрузку в обход неисправного элемента. Конечно, выходное напряжение всей цепочки уменьшится на 0,5 В, но устранится источник саморазрушающей силы и батарея продолжает нормально функционировать. Без шунтирующих диодов она бы полностью вышла из строя. На практике нецелесообразно шунтировать каждый элемент батареи. Необходимо руководствоваться соображениями экономии и использовать шунтирующие диоды, исходя из разумного компромисса между надежностью и стоимостью. Как правило, один диод используют для защиты четверти батареи. Таким образом, на всю батарею требуется всего 4 диода. В этом случае эффект затенения будет приводить к 25%-ному снижению выходной мощности.

Не все элементы выдают одинаковую мощность при одинаковых условиях освещенности, даже если элементы идентичны по размерам и конструкции. Отклонения в технологических режимах могут повлечь за собой заметный разброс выходных токов элементов одной партии. Эти факторы необходимо учитывать при разработке и изготовлении конструкций с солнечными элементами.

Следовательно, если необходимо обеспечить максимальную отдачу от фотоэлектрических преобразователей, необходимо проверить все элементы. Чтобы лучше понять, какие параметры подлежат проверке, сначала рассмотрим характеристики кремниевого солнечного элемента.

При работе с любым источником питания необходимо представлять себе, какова связь между собой напряжения и тока, а также зависимость их от нагрузки. В большинстве случаев взаимосвязь определяется законом Ома. Кремниевые солнечные элементы являются нелинейными устройствами и их поведение нельзя описать простой формулой. Вместо нее для объяснения характеристик элемента можно пользоваться семейством простых для понимания кривых (рис. 4).

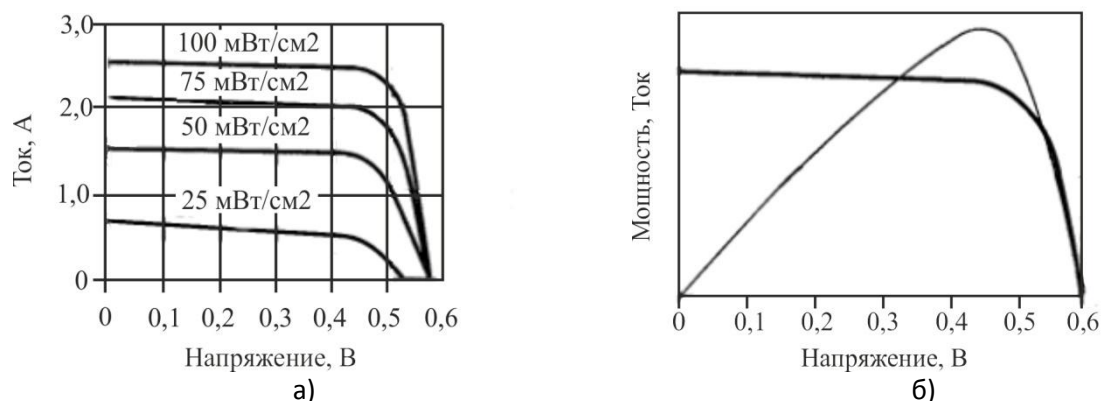


Рис. 4. Характеристики солнечного элемента: а) Вольт-амперные характеристики: 100 мВт/см<sup>2</sup> соответствуют энергетической освещенности, создаваемой прямым потоком солнечного излучения на поверхности земли на уровне моря в полдень при ясном небе; 75 мВт/см<sup>2</sup> соответствуют 3/4; 50 мВт/см<sup>2</sup> — 1/2; 25 мВт/см<sup>2</sup> — 1/4 этой освещенности; б) кривая мощности

Исследовать характеристики солнечного элемента представленные на рис. 4а и 4б можно более детально с помощью схемы, представленной на рис. 5. В схеме измеряются выходные напряжения и ток, протекающий через переменную резистивную нагрузку. Будем предполагать, что интенсивность света в процессе измерения остается постоянной.

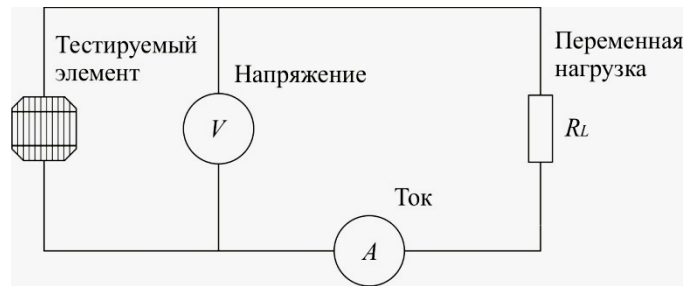


Рис. 5. Схема исследования вольт-амперных характеристик солнечного элемента.

Сначала с помощью потенциометра установим максимальное значение сопротивления. При этом фактически в цепи нет никакого тока и результирующее выходное напряжение можно считать равным напряжению холостого хода, представляющему собой напряжение, которое генерирует элемент, когда к нему не подключено никакой нагрузки. Оно составляет около 600 мВ (0,6 В). Величина этого напряжения может незначительно изменяться от одного элемента к другому в одной партии или от одной фирмы-изготовителя к другой.

При уменьшении сопротивления резистора элемент все более нагружается. Как и в случае обычной батарейки питания, это вызывает возрастание потребляемого тока. Одновременно выходное напряжение немного падает, как это и должно произойти с нестабилизированным источником питания. Затем достигается такое положение, когда с уменьшением сопротивления нагрузки выходной ток более не увеличивается. Ничто не может привести к увеличению тока — даже короткое замыкание. На практике этот ток называют током короткого замыкания. Солнечный элемент стал источником постоянного тока. Напряжение же будет постоянно уменьшаться пропорционально возрастанию нагрузки. Как только сопротивление нагрузки станет равным нулю, напряжение упадет до нуля. Короткое замыкание фотоэлектрического преобразователя не приводит к выходу его из строя.

График зависимости выходной мощности от напряжения изображен на рис. 4б. На одном конце графика имеется максимальный ток при нулевом напряжении. На другом конце графика имеется максимальное напряжение при нулевом токе. Между этими двумя пределами при работе фотоэлектрического преобразователя в нагрузке выделяется мощность, причем пиковая мощность выделяется лишь в одной точке. Именно в ней совокупность всех факторов обеспечивает отбор наибольшей энергии от солнечного элемента. Пиковая мощность соответствует напряжению около 450 мВ (0,45 В). То, что семейство кривых тока (рис. 4а) имеет одинаковую форму, означает, что мы всегда получим максимальную мощность при одном и том же напряжении независимо от яркости солнца. Конечно, фактическая мощность будет зависеть от интенсивности солнечного излучения в данное время, однако пиковая мощность будет наблюдаться при одном и том же напряжении. Таким образом, чтобы правильно оценить качество кремниевого солнечного элемента, необходимо нагрузить его так, чтобы выходное напряжение равнялось 0,45 В, а затем измерить выходную мощность.

### Выводы

Из приведенных рабочих характеристик солнечных элементов видно, что для достижения наибольшей эффективности требуется правильный подбор сопротивления нагрузки. Для этого солнечные элементы не подключают напрямую к нагрузке, а используют систему управления отбором мощности солнечных элементов, обеспечивающую их оптимальный режим работы. Для того, чтобы питание силовой установки не зависело от интенсивности солнечного излучения и режима работы солнечной батареи необходимо установка аккумуляторных батарей и системы управления оптимальной их зарядки.

### Список литературных источников

1. Казак В. Н, Самков О.В. «Безпілотні літальні апарати». – Киев: НАУ, 2010. – 600 с.
2. Т. Байерс «20 конструкций с солнечными элементами». – Москва: Мир, 1988. – 199 с, стр.12.
3. [http://www.solar-impulse.com/en/documents/challenge\\_history.php?lang=en&group=challenge](http://www.solar-impulse.com/en/documents/challenge_history.php?lang=en&group=challenge)
4. <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios/index.html>